

SENSIBILIDAD DEL ENSAYO FÉNIX SOBRE MEZCLAS DISCONTINUAS. EFECTO DE LA ADICIÓN DE FIBRA SINTÉTICA CON VARIACIÓN EN EL CONTENIDO DE ASFALTO

Lorena Villa Barradas¹, Saúl Castillo Aguilar²,
Adriana Martínez Reguero³

¹ YUTAVE Ingeniería, S.A. de C.V., Cardel-Veracruz, México, lvilla@yutave.com, lore_9323@hotmail.com

² Universidad Veracruzana, Xalapa-Veracruz, México, sacastillo@uv.mx, sacasa6@hotmail.com

³ Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, adriana.martinez@upc.edu

Resumen

El principal problema que presentan los pavimentos flexibles son las fisuras. Sin embargo, para la etapa de diseño generalmente no se toma en cuenta esta propiedad.

Actualmente, para las capas de rodaduras como es el caso de las mezclas tipo BBTM, se utiliza el ensayo de Tracción indirecta para conocer su susceptibilidad a la humedad y se dejan de lado propiedades tan importantes como lo son la resistencia a la fisuración y la energía de fractura.

De igual manera, se busca que los pavimentos a pesar de haber presentado la falla resistan durante un mayor tiempo. Por ello, se realiza el presente trabajo de investigación, cuyo objetivo es determinar el efecto de la adición de fibra sintética sobre mezclas discontinuas tipo BBTM 8B, a las temperaturas 5 y 20°C mediante la utilización del ensayo Fénix, con variación en el contenido de asfalto. Fue desarrollada en el Laboratorio Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, donde a partir del Ensayo Fénix se determinan dichas características importantes de la mezcla. Además de valorar el beneficio que otorga la adición de la fibra en estas propiedades.

Palabras Clave: Fénix, BBTM, Fibras.

1 Introducción

Los pavimentos flexibles predominan en México y en el mundo. Sin embargo, la fisura por fatiga es uno de los principales problemas por el cual se ven afectados. Las fisuras son causadas por la acción repetida del tráfico y los cambios de temperatura. Esto se debe a que la acumulación de deformaciones que se producen por las cargas sobrepasa el límite de resistencia de los pavimentos.

El problema se puede atribuir a que en la actualidad el diseño de los pavimentos se enfoca en dar prioridad de solución a un sólo problema de las mezclas asfálticas, por lo que son diseños restringidos que ocasionan la falla antes de que un pavimento complete su vida útil.

Y es que, para poder abarcar la mayoría de las características mecánicas de un pavimento, se requiere de un conjunto de ensayos que encarecen el diseño y lo vuelven complejo y de larga duración, por lo que generalmente se da prioridad a una característica o no se realizan ni se contemplan en el diseño ni en el control de calidad.

Ante esta situación la Universidad Politécnica de Cataluña creó un método sencillo y económico para la determinación de la resistencia a la fisuración en mezclas asfálticas, el cual es llamado ensayo Fénix, con el que se puede inducir propiedades de rigidez y tenacidad de la mezcla.

En la presente investigación se prueba una mezcla tipo BBTM en el ensayo Fénix con la adición de fibra sintética para analizar su efecto. Asimismo, se evalúa la sensibilidad del ensayo ante la variación en el contenido de asfalto.

De esta manera, al ser un método nuevo en proceso de normalización, se beneficia para definir el ensayo como confiable y poder extender su aplicación a otros países.

2 Materiales empleados

Cuando se habla de mezclas asfálticas se hace referencia a la combinación de material asfáltico, agregado pétreo, una porción de filler y en ocasiones algún tipo de aditivo. Las mezclas en las que se enfocó la presente investigación son el tipo BBTM, que se consideran de acuerdo con el “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. Parte 5ª. Firmes. Capítulo IV. Mezclas bituminosas. Artículo 543. Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas” (a partir de ahora llamado como PG 3) como mezcla para capa de rodadura con granulometría discontinua. Es decir, que hay mayor porcentaje de agregado grueso con respecto al agregado fino y la composición de tamaños presenta un salto. Este tipo de mezclas se utilizan para capas de rodadura de dos a tres centímetros y el tamaño máximo nominal del agregado pétreo no supera los 11 mm y una elevada macrotextura superficial mayor a 1.5 mm [1].

Los materiales que componen la mezcla de estudio son en primera instancia, el material asfáltico, que, en caso particular, se consideró un cemento asfáltico PMB 45/80-65, el cual se denota así por sus siglas en inglés POLYMER MODIFIED BITUMEN. Este es un asfalto modificado con polímeros o caucho, que en una etapa de diseño se puede utilizar con la categoría de tráfico pesado T00, T0 y T1, que pertenecen a ≥ 4000 , de 3999-2000 y de 800-1999 vehículos pesados/día, según corresponda. En la Tabla 1. Se muestran las características del cemento asfáltico utilizado.

Tabla 10. Características del cemento asfáltico PMB 45/80-65

Características	Normativa aplicable	Especificación	Valor obtenido
Penetración a 25° C, 0.1 mm	UNE-EN-1426	45-80	57
Punto de reblandecimiento, °C	UNE-EN 1427	≥ 65	65.3
Punto de Fragilidad Fraass, °C	UNE-EN 12593	≤ -15	-15
Punto de Inflamación, °C	UNE-EN 2592	≥ 235	290

Por consiguiente, el agregado pétreo utilizado es un agregado de trituración, es pórfido para el agregado grueso y calizo para el agregado fino.

El material calizo es común, abundante y económico en los procesos de trituración, se emplea generalmente en todas las capas de los pavimentos, exceptuándose en algunas ocasiones como agregado grueso en las capas de rodadura, debido a la facilidad que tiene de pulimentarse en condiciones de servicio, su carácter es básico, presenta por lo regular menores problemas de adhesividad, es decir, de afinidad con los ligantes asfálticos. En mezclas asfálticas se utiliza en conjunto con agregados más duros, pero también ácidos como el silíceo o el pórfido, esto con la finalidad de mejorar la característica de adhesividad que carecen los materiales ácidos [2].

El material pórfido es adecuado para el uso de capa de rodadura debido a la característica de resistir al pulimento. Se considera un agregado ácido debido al alto contenido en sílice, el cual presenta una gran afinidad por el agua, pero una deficiencia en la adhesividad con el cemento asfáltico [2].

Por lo tanto, al combinar ambos materiales se genera una mezcla más completa y con mejores cualidades. En la Tabla 2. Se muestran los valores obtenidos en la caracterización de los agregados pétreos.

Con lo que respecta al filler, el carbonato de calcio denotado por su fórmula CaCO_3 se caracteriza por ser insoluble en agua y soluble en ácidos con desprendimiento de anhídrido carbónico.

Tabla 11. Características del agregado pétreo

Característica	Normativa aplicable	Especificación	Valor obtenido
Agregado grueso			
Partículas Total y Parcialmente trituradas, % en masa,	UNE-EN-933-5	100	100
Índice de Lajas, % en masa,	UNE-EN 933-3	≤ 20	20
Coefficiente de Los Ángeles (LA), %, máximo	UNE-EN 1097-2	≤ 15	15
Coefficiente de Pulimento Acelerado (PSV), %,	UNE-EN 1097-8	≥ 56	55
Agregado fino			
Equivalente de Arena, %	UNE EN 933-8	No especificado	50
Contenido de Finos, %	UNE EN 933-1	No especificado	3
Densidad de Partículas, g/cm ³	UNE EN 1097-6	No especificado	2.4-2.8

Como aditivo a la mezcla se agregó una fibra sintética que se compone principalmente por Aramida y fibras de poliolefinas. Son fibras sintéticas, químicamente inertes, se mezclan de forma rápida y se distribuyen uniformemente en las mezclas asfálticas. Las ventajas que se esperan con el uso de la fibra es controlar y reducir las fisuras.

3 Mezcla BBTM

Durante la fabricación de la mezcla de diseño se mantiene constante la granulometría de agregados, el porcentaje de fibra, la temperatura de mezclado y compactado (155 °C) y la energía de compactación (50 golpes por cara con el compactador de impacto Marshall). Mientras que, se varía el porcentaje de asfalto sobre agregado pétreo (4.00%, 4.75% y 5.50%) y la temperatura de ensayo (5 y 20°C).

Para determinar el análisis de sensibilidad se realizaron dos grupos de mezclas, cada uno con tres series de 11 probetas de 800 gramos de agregado de 5 cm de altura. El primero denominado mezclas de control y el segundo mezclas adicionadas con fibras.

3.1. Mezcla de control

Mezcla tipo BBTM 8B con 4.00% de cemento asfáltico.

Mezcla tipo BBTM 8B con 4.75% de cemento asfáltico.

Mezcla tipo BBTM 8B con 5.50% de cemento asfáltico.

3.2. Mezcla adicionadas con fibras

Mezcla tipo BBTM 8B con 4.00% de cemento asfáltico y 0.05% de fibra sintética.

Mezcla tipo BBTM 8B con 4.75% de cemento asfáltico y 0.05% de fibra sintética.

Mezcla tipo BBTM 8B con 5.50% de cemento asfáltico y 0.05% de fibra sintética.

3.3. Granulometría

La mezcla de estudio tiene un tamaño máximo nominal de 11.2 mm y se ajustó al centro de los límites de la abertura de las mallas de acuerdo con la norma UNE-EN 933-2, como se muestra en la Tabla 3 y la Figura 1.

Tabla 12. Composición granulométrica mezcla tipo BBTM 8B

Malla	Porcentaje que pasa en masa	
	Límite inferior	Límite superior
Abertura (mm)		
11.2	100	100
8	90	100
5.6	42	62
4	17	27
2	15	25
0.5	8	16
0.063	4	6

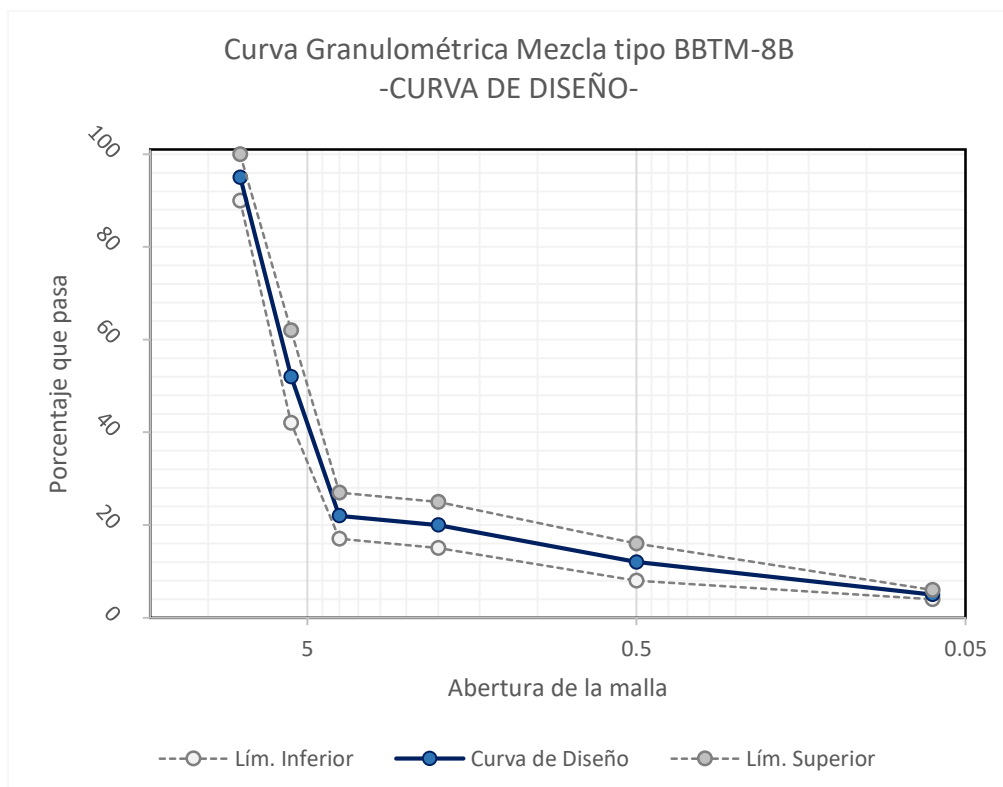


Figura 18. Composición Granulométrica

4 Ensayo fénix

El ensayo Fénix es un ensayo estático monotónico de tracción directa a velocidad de desplazamiento constante de 1mm/min, que se diseñó en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) por el Dr. Félix E. Pérez Jiménez y su equipo de trabajo. Es distinguido por ser un método sencillo y económico.

Tiene como objetivo la evaluación de la resistencia a la fisuración de una probeta de mezcla asfáltica. Su metodología se basa en aplicar tracción a una probeta semicilíndrica, a la que se le realiza una hendedura de 6 mm aproximadamente en la sección media para facilitar el inicio de la fisura.

La tracción se efectúa a partir de unas placas metálicas pegadas a la cara plana de la probeta. En el ensayo se registra la carga en función del desplazamiento aplicado para obtener datos sobre la rigidez del material, la ductilidad y la energía de ruptura.

Con el ensayo se puede obtener varios parámetros que ayudan a inferir el comportamiento de la mezcla. Sin embargo, para fines de la presente investigación se consideran cuatro parámetros como los

más importantes, dos referentes a la etapa antes la ruptura (Resistencia a Tracción, Índice de Rigidez a Tracción) y dos posteriores (Energía de Fractura, Desplazamiento al 50% de la carga máxima post-pico).

Para su ejecución se hace uso de una prensa 810 MTS (Material Test System), la cual mantiene la temperatura durante el ensayo de 5 y 20°C según corresponda.

Las placas se sostienen con dos tornillos que se conectan a las mordazas de la prensa. Se aplica una fuerza de tensión que produce que la fisura se propague en la probeta hasta llegar a la fractura.

El ensayo se detiene cuando el desplazamiento es mayor que 4 mm y la carga inferior a 6 kgf.

A continuación, se presenta una serie de ilustraciones del montaje y proceso del ensayo Fénix con la mezcla de estudio en la Figura 2.

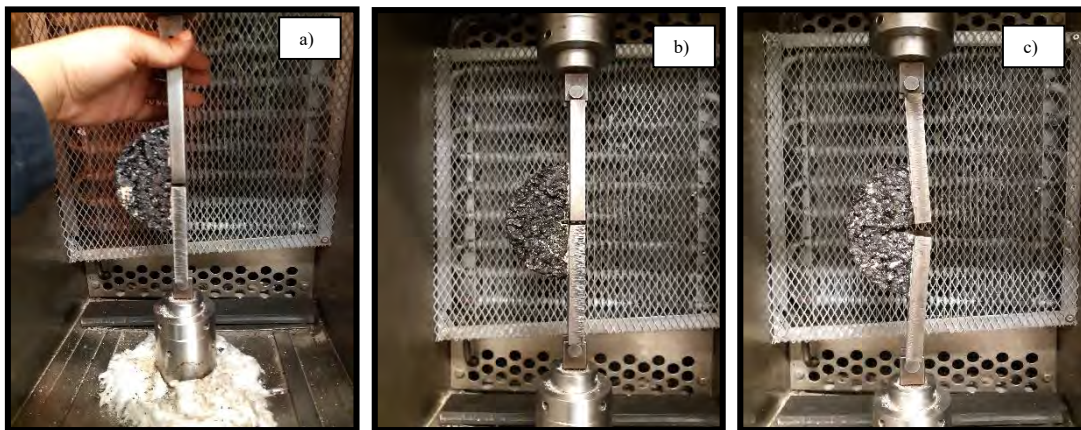


Figura 19. a) Montaje de probeta. b) Probeta montada a prensa 810 MTS. c) Probeta fracturada.

3.1. Parámetros empleados

$$RT = 1000 * \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (1)$$

Donde RT es la Resistencia a Tracción en MPa, $F_{m\acute{a}x}$ es la carga máxima en KN y A es el área de fractura en mm.

$$IRT = 1000 * \frac{F_{50} - F_{25}}{A * (d_{50} - d_{25})} \quad (2)$$

Donde IRT es el índice de Rigidez a Tracción en MPa/mm, F_{50} , F_{25} : $\frac{1}{2}$ de la carga máxima y $\frac{1}{4}$ de la carga máxima en KN y d_{50} , d_{25} son el desplazamiento a $\frac{1}{2}$ $F_{m\acute{a}x}$ y $\frac{1}{4}$ $F_{m\acute{a}x}$ en mm y A es el área de fractura en mm.

$$GF = \int_0^{df} \frac{f(x) * dx}{A} \quad (3)$$

Donde GF se define como la energía de fractura en J/m², $f(x)*dx$ es el área bajo la curva de carga desplazamiento y A es el área de fractura en mm.

El último parámetro empleado es el desplazamiento al 50% de la carga máxima en la zona postpico denotado como $d_{0.5PM}$ en mm. Este parámetro permite valorar la ductilidad y tenacidad de la mezcla.

3.2. Criterios de diseño

Se toman los datos y afirmaciones del artículo “Diseño se mezclas discontinuas para capas de rodadura a partir de la determinación de su resistencia a la fisuración y energía de fractura mediante el ensayo Fénix” [3].

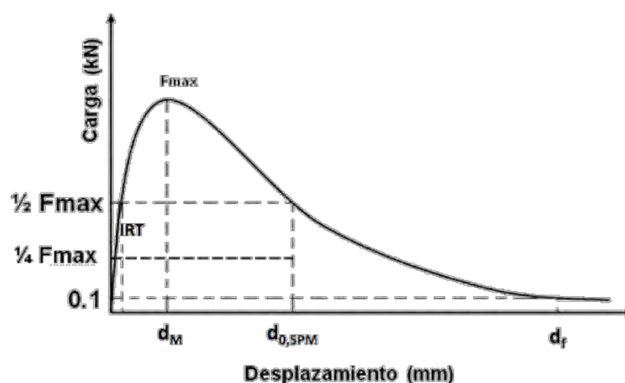


Figura 20. Curva carga – desplazamiento obtenida en el ensayo Fénix [3]

La Figura 3. muestra la curva de esfuerzos resultantes del ensayo Fénix de donde se obtienen los parámetros relacionados con las características mecánicas y resistentes de la mezcla. Los valores propuestos en el artículo antes mencionado se presentan en la Tabla 4.

Tabla 13. Criterios de diseño propuestos para las mezclas discontinuas a 20°C, tipo BBTM clase B. [3]

Parámetros		Valor propuesto
Vacíos (%)		>12
Índice de Rigidez a Tracción (MPa/mm)		>0.40
Energía de Fractura (J/m ²)		>300
Índice de Tracción (J/m ²)	Adecuado	>150
	Bueno	>300
	Excelente	>600
d0.50PM (mm)	Adecuado	>0.40
	Bueno	>1
	Excelente	>3

4 Sensibilidad del ensayo fénix

La sensibilidad del ensayo hace referencia que ante la presencia de variables el ensayo a partir de una metodología estadística perciba dichos cambios en los resultados de los diferentes parámetros.

En la investigación se hacen dos corridas de análisis, la primera es observar la variación del contenido de asfalto en las mezclas y la segunda es la variación del contenido con adición de fibra sintética de refuerzo.

La metodología estadística que se utiliza se realiza con el software Minitab 18. En primer lugar, se obtienen los valores atípicos con la prueba de Grubbs, se calcula el límite de repetibilidad para cada parámetro, se continua con la prueba de normalidad (Kolmogorov-Smomov), seguida de la prueba de varianzas iguales, para la comparación de parámetros con tres variables se utiliza el ANOVA de un solo factor y para comparar las mezclas de control y las mezclas adicionadas con fibras se usa la prueba t Student de 2 muestras.

5 Análisis de resultados

5.1. Densidad máxima y porcentaje de vacíos

La variación del contenido de asfalto sobre la mezcla afecta directamente al porcentaje de vacíos. Se observa que conforme se aumenta el porcentaje de asfalto sobre agregado, se presentan mezclas con menor porcentaje de vacíos, es decir, mezclas más cerradas.

Sin embargo, al comparar las mezclas de control y las adicionadas con fibra no se presentan diferencias significativas. Por lo que, se puede concluir que la adición de la fibra no afecta tanto en la densidad máxima como en el porcentaje de vacíos.

Ya que, la variación en el porcentaje de vacíos es debida a la densidad geométrica, la cual está relacionada a la variación que existe entre las dimensiones de las probetas de mezcla asfáltica.

La Tabla 5. y la Figura 4. muestran el concentrado promedio de la densidad máxima, densidad geométrica y porcentaje de vacíos de las probetas analizadas tanto para las mezclas de control, como las mezclas adicionadas con fibra.

Tabla 14. Concentrado de densidad máxima, densidad geométrica y porcentajes de vacíos de mezclas de estudio

Mezcla	Porcentaje de asfalto, %	Densidad máxima, g/cm ³	Densidad geométrica, g/cm ³	Porcentaje de vacíos, %
Control	4.00	2.60	2.06	20.92
	4.75	2.53	2.10	17.53
	5.50	2.51	2.12	15.70
Adicionada con fibra	4.00	2.58	2.07	19.94
	4.75	2.52	2.08	17.54
	5.50	2.50	2.10	16.02

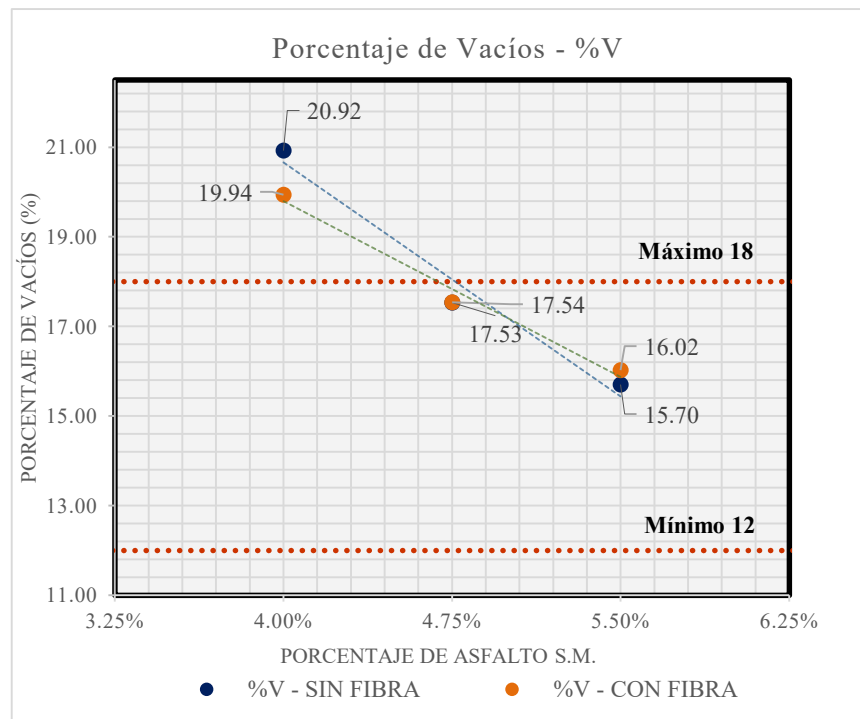


Figura 21 . Porcentaje de vacíos

5.2. Resistencia a tracción

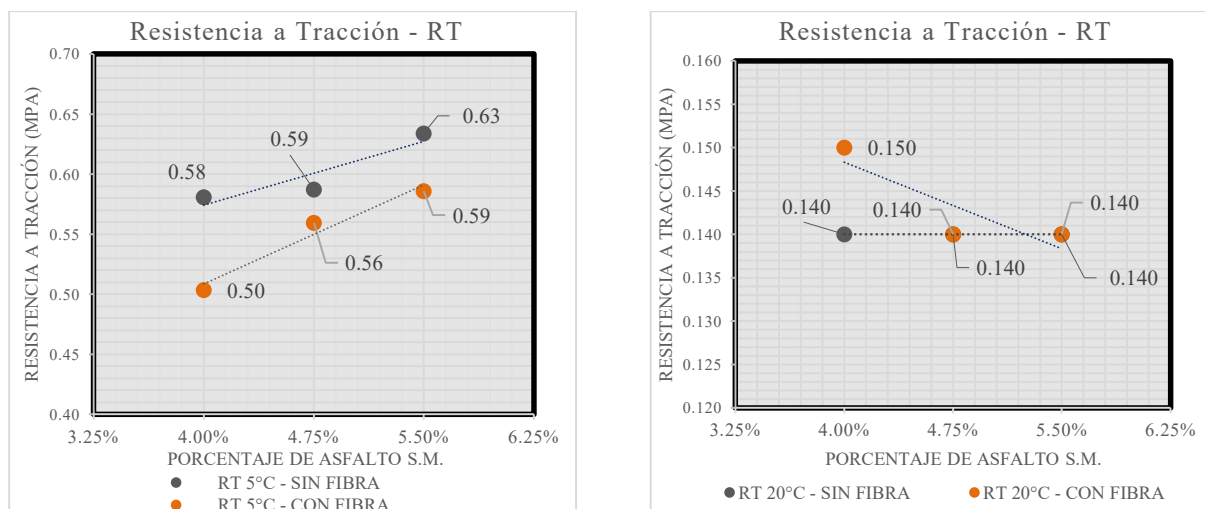


Figura 22. Resistencia a tracción -mezcla de control vs mezcla adicionada con fibra (5 y 20°C)

En primera instancia, se observa en la Figura 5. que hay diferencias significativas en el porcentaje de 4.00% de asfalto s.a. entre las mezclas de control y las mezclas adicionadas con fibra sintética.

A los 5°C las diferencias significativas son en los porcentajes extremos (4.00% y 5.50%) y son a favor de las mezclas de control. Por lo tanto, la adición de fibra sintética a los 5°C no le aporta mayor resistencia a la fisuración, caso contrario a la temperatura de 20°C, cuando se observa que en el porcentaje menor de asfalto la adición de fibra sintética produjo una mezcla más resistente a la fisuración y significativamente diferente a la mezcla de control.

En el porcentaje intermedio de 4.75% no se observó ningún cambio significativo, lo que podría interpretarse que las mezclas tienen un comportamiento de resistencia a la tracción similar.

5.3 índice de rigidez a tracción

Cuando se analiza el parámetro de índice de rigidez a tracción, se observa en la Figura 6. que hay diferencias significativas en las series de 4.00% de asfalto. Sin embargo, a los 5°C las mezclas con mayor rigidez son las mezclas de control, caso contrario a la temperatura de 20°C. Por lo que, cuando se habla de rigidez, la adición de fibra sintética en las mezclas tipo BBTM 8B con las características presentadas en esta investigación presentan una mejora en la temperatura de 20°C, pero cuando la temperatura disminuye con ella disminuye la propiedad de rigidez.

En los otros porcentajes no se observan cambios significativos cuando se adiciona fibra sintética a la mezcla.

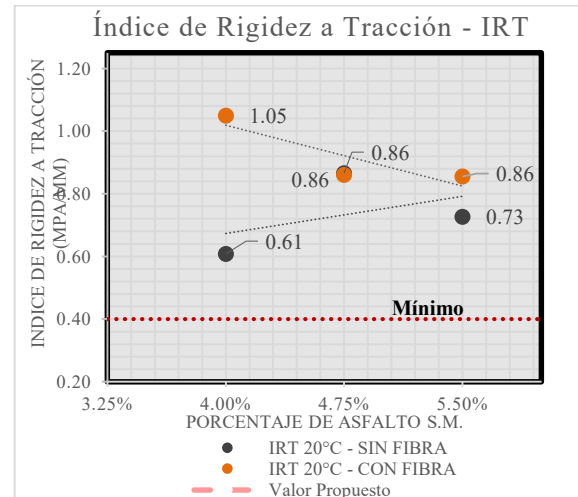
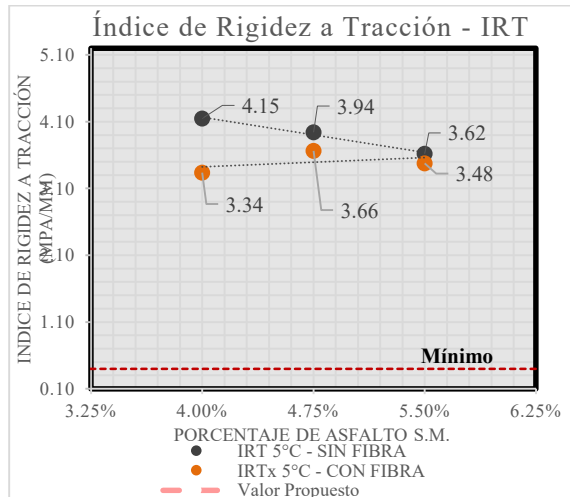


Figura 23. Índice de rigidez a tracción - mezcla de control vs mezcla adicionada con fibra (5 y 20°C)

5.4. Energía de fractura

Como se observa en la Figura 7. En el parámetro de energía de fractura, las únicas series que presentaron diferencias significativas fueron las de 4.75% de asfalto s.a. a la temperatura de 5°C. La diferencia observable es que al adicionar fibra sintética la mezcla se vuelve más dúctil y requiere mayor energía para que se produzca la ruptura.

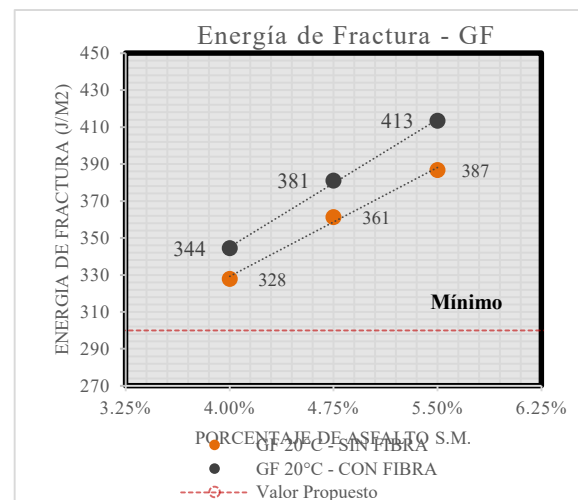
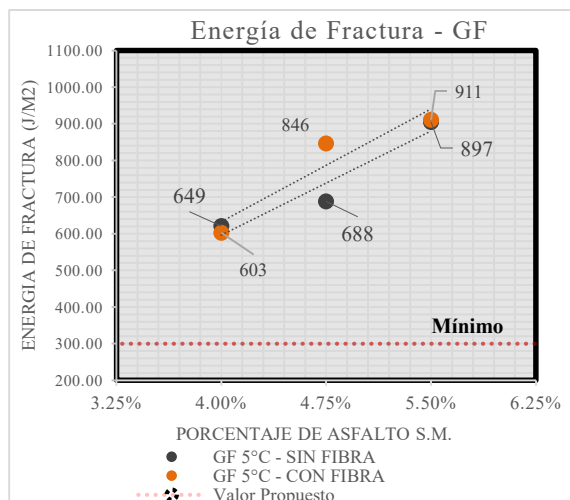


Figura 24. Energía de fractura - mezcla de control vs mezcla adicionada con fibra (5 y 20°C)

5.4. Deformación al 50% de la carga máxima postpico

En la Figura 8. se muestra que, la temperatura de 5°C todas las mezclas que se les adicionó fibra sintética presentan mejoras consideradas estadísticamente significativas, en las que se observan mezclas más dúctiles y tenaces. A los 20°C la única mezcla que presenta esas mismas condiciones es la que tiene 4.75% de asfalto s.a.

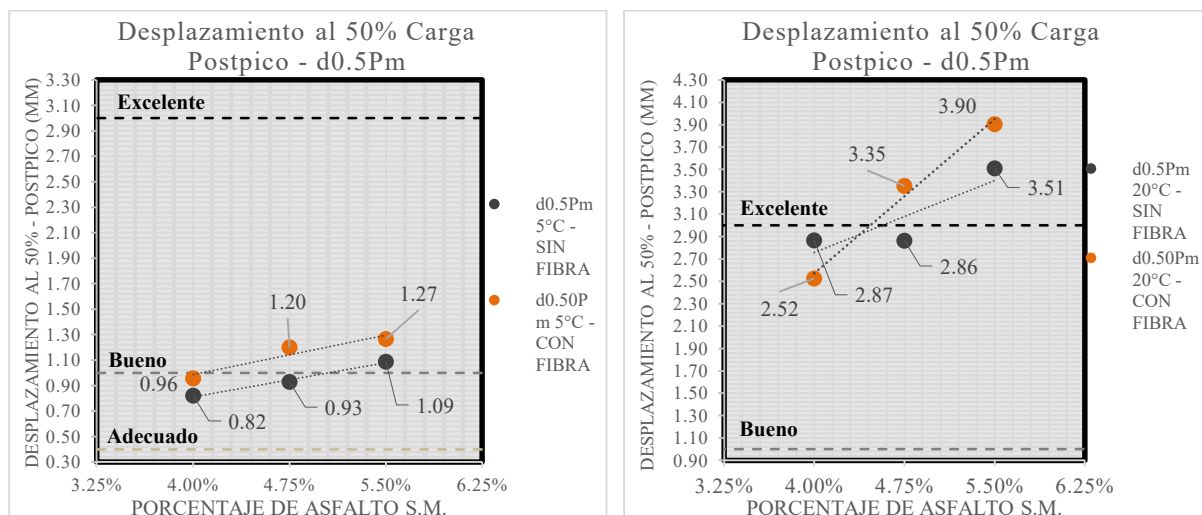


Figura 25. Deformación al 50% de la carga máxima postpico - mezcla de control vs mezcla adicionada con fibra (5 y 20°C)

6 Conclusiones

Las mezclas con 4.00% de asfalto s.a. (sobre agregado) no cumplen con lo requisitado en el pliego de especificaciones (PG-3, Artículo 543) para mezclas tipo BBTM 8B, en el que establece que los porcentajes de huecos requeridos están entre 12 y 18%. Por otro lado, la adición de fibra sintética en estas mezclas mostró mejoras en la rigidez a los 20°C. Sin embargo, al disminuir la temperatura a 5°C decreció también la rigidez. Lo anterior nos muestra que las mezclas no tienen un comportamiento constante.

La adición de fibra sintética a las mezclas con 4.75% de asfalto s.a. mantiene constante la propiedad de la rigidez, pero vuelve a las mezclas más dúctiles y tenaces. Con lo que se infiere, gracias al ensayo Fénix, que en una etapa de diseño los pavimentos con estas condiciones pueden ser más duraderos después de que se presente la ruptura. Es decir, que con la adición de fibra en este porcentaje se encuentra un equilibrio entre dos de las propiedades más importantes de un pavimento que son la rigidez y la ductilidad. En la primera un valor muy por encima del valor mínimo propuesto por el Dr. Félix E. Pérez Jiménez y su equipo de trabajo y en la segunda propiedad que es la ductilidad valores en el rango bueno y excelente.

Con los análisis realizados se comprueba que mediante el ensayo Fénix se logra percibir el cambio de variable tanto del contenido de asfalto como la adición de fibra sintética a las mezclas, principalmente en los parámetros de Energía de fractura y Deformación al 50% de carga post pico. Lo que lo hace un ensayo adecuado para inferir el comportamiento a la fisuración de las mezclas BBTM 8B a las temperaturas de 5 y 20°C.

El ensayo Fénix es un ensayo veraz y preciso, demostrado con el límite de repetibilidad por cada variable analizada.

7 Referencias

- [1] Trabit (2016). FICHA PRODUCTO *Mezcla discontinua en caliente BBTM 8B*. Recuperado de www.trabit.com.
- [2] Padilla Rodriguez, A. (2004). “*Análisis de la resistencia a las deformaciones Plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*”. Tesina. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2099.1/3334>.
- [3] Miró, R.; Pérez-Jiménez, F.; Martínez, A.; Botella, R. (2015). “*Diseño de mezclas discontinuas para capas de rodadura a partir de la determinación de su resistencia a la fisuración y energía de fractura mediante el ensayo Fénix*”. A: Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto. "XVIII CILA: Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto 2015". Bariloche: 2015, p. 1-12.